

**Б.Г. ЛЮБАРСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Д.Ю. ЗЮЗИН**, канд. техн. наук,  
**А.В. ДЕМИДОВ**,  
**Т.В. ГЛЕБОВА**,  
**Е.С. РЯБОВ**

## ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ПРИВОДА НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В роботі розглянута цифрова імітаційна модель тягового привода на основі синхронного двигуна із збудженням від постійних магнітів і системою живлення на основі просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції.

In work a digital simulation model is considered of hauling drive on the basis of synchronous engine with excitation from the permanent magnets and system of feed on the basis of spatial-vectorial latitudinal-impulsive modulation.

Важнейшей частью подвижного состава является система преобразования энергии – тяговый электропривод. Поэтому работа, направленная на определение параметров и характеристик, тягового привода с такого рода двигателями, нам представляется актуальной.

На современном подвижном составе ряда зарубежных стран начато применение синхронных тяговых двигателей с возбуждением от постоянных магнитов[1...3].

Цель работы: разработать цифровую имитационную модель синхронного тягового привода для электропоезда.

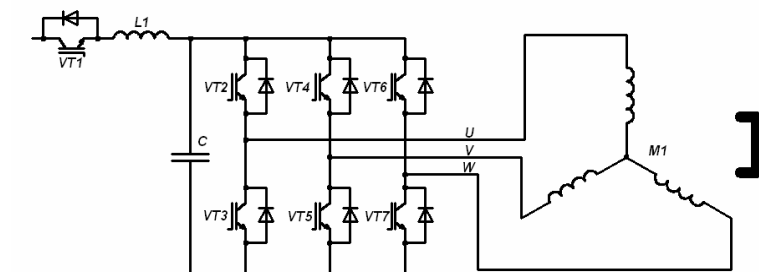


Рис.1. Схема силовой цепи тягового привода

На рис.1 представлена схема силовой цепи тягового привода. Она состоит из импульсного прерывателя, собранного на транзисторе VT1 звена постоянного тока с индуктивным фильтром L1 автономного инвертора напряжения, собранного на транзисторах VT2-VT7 и обратных диодах, а

также тягового двигателя M1. Система управления транзисторами VT2-VT7 реализует пространственно-векторную широтно-импульсную модуляцию. Для регулирования напряжения в звене постоянного тока используется импульсный регулятор. Для упрощения цифрового регулирования работа импульсного регулятора в модели не рассматривается, он заменен регулируемым источником напряжения. Также в работе приняты следующие допущения: транзисторы VT2-VT7 идеальные ключи, обратные диоды – идеальные диоды, источник регулируемого напряжения имеет внутренне сопротивление 10-7 Ом.

Модель тягового привода на основе синхронного тягового двигателя роздана в среде Matlab-Simulink. На рис. 2 представлена общая блочная схема цифровой модели привода.

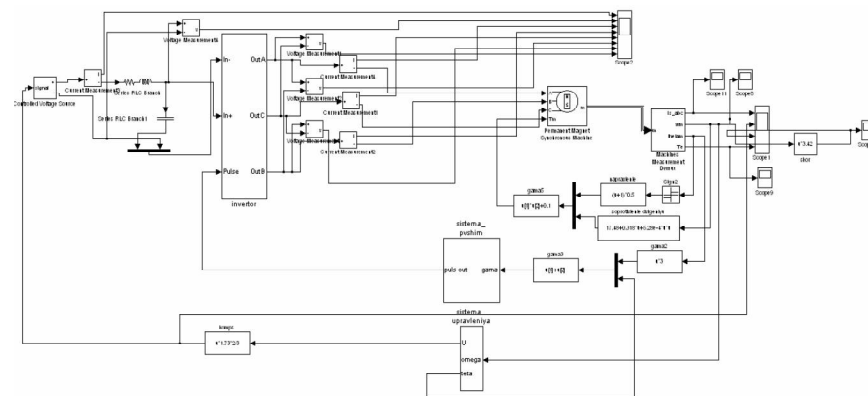


Рис. 2. Общая блочная схема цифровой модели привода

Рассмотрим основные блоки. Блок Controlled Voltage Source реализует регулируемый источник напряжения (импульсный прерыватель). Блок Series RLC Branch внутреннее сопротивление источника питания и индуктивный фильтр звена постоянного тока. Блок-подсистема Inverter – мостовой трехфазный инвертор напряжения. Блок-подсистема sistema-pvshim реализует алгоритм пространственно-векторной модуляции ключей инвертора напряжения. Блок-подсистема sistema upravleniya реализует алгоритм управления напряжением питания двигателя и задания угла коммутации в зависимости от частоты вращения. Блок Permanent Magnet Synchronous Machine – синхронный двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Блок Machines Measurement Demux – блок индикации рабочих параметров тягового двигателя. Блок soprotivlenie dviganiyu определяет момент сопротивления двигателя в зависимости от частоты его вращения. Блоки napravlenie и Sign2 определяют направление момента сопротивления в зависимости от знака угловой координаты.

наты. Блок gamma5 задает суммарный момент сопротивления двигателя с учетом знака.

Блок gamma2 определяет угловую координату ротора в электрических градусах. Блок gamma3 задает угол управления тягового двигателя. Блок skor определяет скорость движения поезда в зависимости от частоты вращения тягового двигателя. Блок comp5 увеличивает напряжение в звене постоянного тока на величину, необходимую для компенсации потерь напряжения при работе пространственно-векторной ШИМ. Блоки-измерители Current Measurement1-Current Measurement4 определяют величины токов в звене постоянного тока и в фазах двигателя. Блоки - измерители Voltage Measurement1- Voltage Measurement4 определяют величины напряжений в звене постоянного тока и линейные напряжения тягового двигателя. Блок - электронный осциллограф Scope1 выводит параметры работы тягового двигателя: токи фаз, напряжение питания, скорость движения, момент тягового двигателя. Блок - электронный осциллограф Scope2 выводит значения токов и напряжений в звене постоянного тока и в фазах тягового двигателя. Блоки - электронные осциллографы Scope8- Scope11 предназначены для вывода в рабочую область параметров работы тягового привода. Рассмотрим состав подсистем, входящих в цифровую модель тягового привода.

Подсистема inverter. Подсистема состоит из шести одинаковых подсистем, реализующих работу электронных ключей (IGBT-транзистор + обратный диод). Каждый электронный ключ состоит из блоков Ideal Switch и Diode, реализующих соответственно IGBT-транзистор и обратный диод, а также коммутационного конденсатора и электронного вольтметра, определяющего напряжение на переходе коллектор-эмиттер.

Подсистема sistema\_pvshim реализует алгоритм пространственно-векторной модуляции ключей инвертора напряжения.

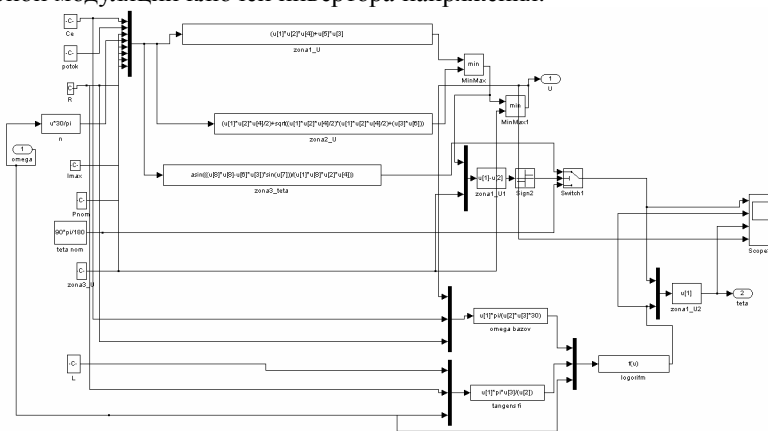


Рис. 3. Подсистема sistema\_upravleniya.

Подсистема sistema\_upravleniya (рис 3) подсистема формирует сигналы управления напряжением в звене постоянного тока и сигнала задания угла управления. Система состоит из трех независимых каналов, соответствующих работе тягового электропривода в режимах ограничения тока, постоянной мощности и ограничения напряжения. Блок n предназначен для перевода величины угловой скорости из рад/сек в об/мин. Блок zonal\_U предназначен для вычисления величины задания напряжения в звене постоянного тока в режиме ограничения тока. Блок zonal2\_U предназначен для вычисления величины напряжения в звене постоянного тока в режиме постоянной мощности. Блок zonal3\_U предназначен для вычисления величины угла управления двигателя в режиме ограничения по напряжению. Блоки MinMax, MinMax1, zonal\_U1, Sign2, Switch1 предназначены для определения по какому из каналов будет происходить регулирование. Блоки omega\_bazov, tangens fi, logorifm, zonal\_U2 предназначены для расчета угла управления.

Результаты цифрового моделирования. Для проведения цифрового моделирования был использован решатель ode23t, точность моделирования  $10^{-5}$ , шаг интегрирования переменный, выбираемый автоматически. Начальные условия: угловая скорость  $\omega$  и угловая координата  $\gamma$  равны нулю. Моделируется разгон электропоезда при заданном ограничении напряжения и частоте широтно-импульсной модуляции 250 Гц.

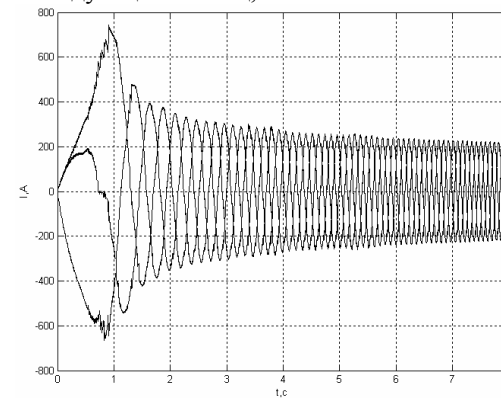


Рис. 4. Фазные токи двигателя

На рисунках 4 и 5 представлены полученные графики фазных токов, скорости движения электропоезда и момента тягового двигателя. Что касается величины момента, можно заметить, что момент двигателя имеет колебательный характер, и частота этих колебаний определяется частотой фазного тока. Величина момента имеет явный максимум (7000 Нм) в интервале начала разгона поезда, вызванный характером сопротивления движению. По мере

достижения поездом заданной скорости величина момента снижается, и держится в пределах 2000 Нм. Максимальное обратное напряжение перехода коллектор-эмиттер в режиме разгона составило 622 В

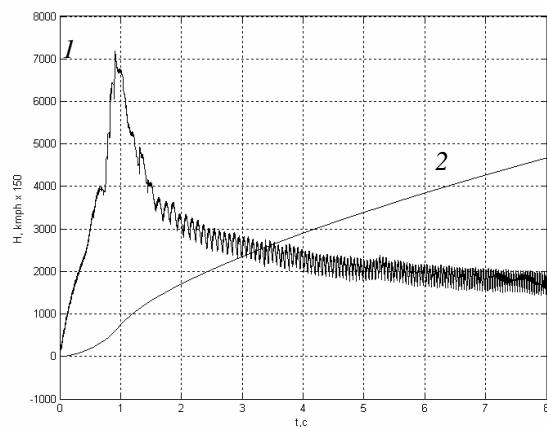


Рис. 5. 1- момент, развиваемый тяговым двигателем, 2- скорость электропоезда.

#### Выводы.

Разработана цифровая модель тягового привода на основе синхронного тягового двигателя с возбуждением от постоянных магнитов в среде Matlab-Simulink. Особенностью модели является формирование фазных токов тягового двигателя по алгоритму пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции.

Предложен алгоритм управления напряжением питания двигателя и задания угла коммутации в зависимости от частоты его вращения.

Проведено цифровое моделирование режима разгона электропоезда на ровном участке пути. По результатам цифрового моделирования определено максимальное обратное напряжение 622 В, максимальный фазный ток 657 А, максимальный момент, развиваемый двигателем 7107 Н·м.

**Список литературы:** 1. Тяговый двигатель с возбуждением от постоянных магнитов. // Железные дороги мира, 2004. – №9. С. 31-36. 2. Тяговый двигатель с возбуждением от постоянных магнитов // Железные дороги мира. – 2004. – № 9. (Т. Klockow et al. *Elektrische Bahnen*, 2003, № 3, S. 107 – 112.). 3. Непосредственный тяговый привод локомотива // Железные дороги мира – 2004 – №1. с. 24 – 31.

*Поступила в редколлегию 5.10.07*